

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІ-
ШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Основи електрики та електроніки, електричні
вимірювання та їх стандартизація»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

за темою № 5 - Дія магнітного поля на струм та рухомі заряди

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного уні-
верситету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

Розробник: викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

Рецензенти:

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

План лекції:

1. Закон Ампера. Фізичний сенс магнітної індукції
2. Застосування закону Ампера до деяких завдань
3. Робота при переміщенні провідника та контуру зі струмом у магнітному полі
4. Сила Лоренца
5. Рух заряджених частинок у магнітному полі
6. Рух заряджених частинок в електричному та магнітному полях

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна:

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків : Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

Допоміжна:

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

Текст лекції

1. Закон Ампера. Фізичний сенс магнітної індукції

Відповідно до закону Ампера на елемент струму $Id\vec{l}$ магнітне поле діє із силою

$$d\vec{F} = [Id\vec{l}, \vec{B}], \quad (1)$$

де \vec{B} – індукція магнітного поля в місці знаходження елемента $Id\vec{l}$.

Сила $d\vec{F}$ перпендикулярна до площини, в якій лежать $Id\vec{l}$ та \vec{B} : якщо дивитися з кінця $d\vec{F}$ на цю площину, то поворот від $Id\vec{l}$ до \vec{B} має відбуватися проти годинникової стрілки (рис. 2.1). Напрямок сили можна визначити також за правилом лівої руки: якщо розмістити ліву руку так, щоб лінії поля входили в долоню, чотири складені пальці вказували напрям струму і долоня при цьому перпендикулярна до площини, в якій лежать вектори $Id\vec{l}$ і \vec{B} , то відставлений на 90° великий палець вкаже напрямок сили $d\vec{F}$.

Модуль сили Ампера

$$dF = IdlB \sin \alpha, \quad (2)$$

де α – кут між векторами $Id\vec{l}$ та \vec{B} .

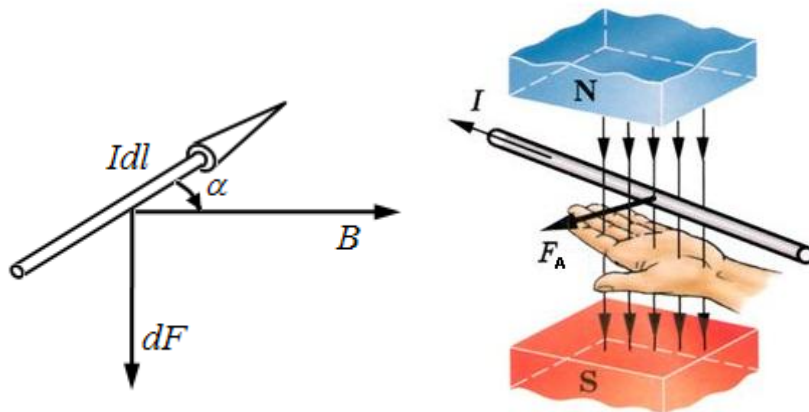


Рисунок 1

Щоб знайти силу, що діє на струм, поточний по провіднику кінцевих розмірів, потрібно проінтегрувати вираз (2.1) по контуру струму (інтегральна форма закону Ампера):

$$\vec{F} = \int_L d\vec{F} = \int_L [Id\vec{l}, \vec{B}]. \quad (3)$$

Індукція магнітного поля \vec{B} – векторна фізична величина, що характеризує силову дію магнітного поля на електричні заряди, що рухаються в ньому, і чисельно рівна модулю сили, з якою магнітне поле діяло б у даній точці на одиничний елемент струму, розташований перпендикулярно до поля.

Одиницею вимірювання індукції є тесла: $1\text{Тл}=\text{Н}/(\text{А}\cdot\text{м})$.

2. Застосування закону Ампера до деяких завдань

Приклад 1. Дія однорідного магнітного поля на прямолінійний відрізок дроту l з струмом I .

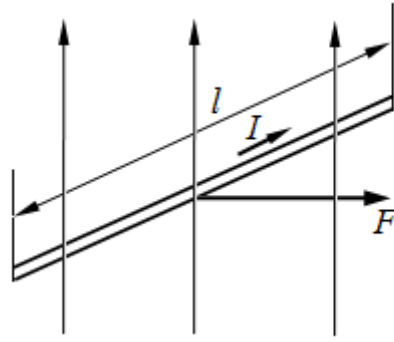


Рисунок 2

Кут між $Id\vec{l}$ та \vec{B} для всіх елементів струму однаковий: α .

$$F = IlB \sin \alpha.$$

Як видно з цієї формули, сила, що діє на прямий струм, залежить від орієнтації струму: вона максимальна, коли струм перпендикулярний до поля ($\sin \alpha = 1$) і мінімальна (рівна нулю), коли струм паралельний або антипаралельний полю ($\sin \alpha = 0$).

Приклад 2. Замкнений плоский контур зі струмом однорідного магнітного поля.

Магнітний момент кругового струму:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}. \quad (3)$$

Магнітний момент струму в рамці \vec{p}_m утворює із напрямком магнітного поля \vec{B} кут α (рис. 4).

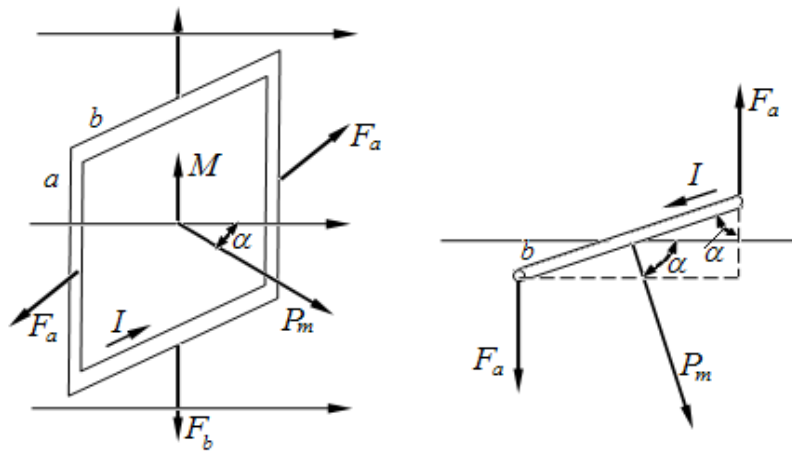


Рисунок 4

Механічний обертальний момент:

$$M = F_a h = F_a b \sin \alpha.$$

Модуль сили F_a буде

$$F_a = IBa \sin 90^\circ.$$

Отже:

$$M = IBab \sin \alpha.$$

Тут $ab = S$ – площа рамки; IS – модуль магнітного моменту струму. Тоді

$$M = p_m B \sin \alpha. \quad (4)$$

Враховуючи взаємну орієнтацію векторів \vec{M} , \vec{p}_m і \vec{B} , формулу (4) можна записати у векторному вигляді:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]. \quad (5)$$

3. Робота при переміщенні провідника та контуру зі струмом у магнітному полі

При переміщенні прямолінійного провідника довжиною зі струмом на напрямку, перпендикулярному до однорідного магнітного поля (рис. 5), під дією сили здійснюється робота

$$dA = Fdr \cos 0 = IlBdr \cos 0. \quad (6)$$

Добуток $ldr = dS$ – площа, яку описує провідник під час свого руху. Величина $BdS \cos 0 = d\Phi$ – магнітний потік, що пронизує цю площу. Отже,

$$dA = Id\Phi. \quad (7)$$

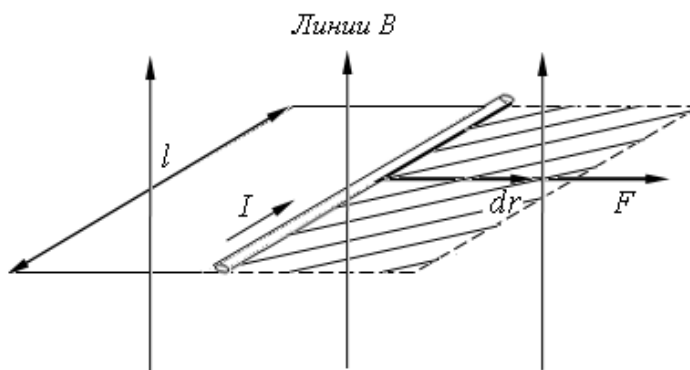


Рисунок 5

Таким чином, елементарна робота, що здійснюється при переміщенні провідника зі струмом в магнітному полі, дорівнює добутку струму I в провіднику на магнітний потік $d\Phi$, що пронизує площу, яку описує провідник при своєму русі. При переміщенні провідника на кінцеву відстань робота буде

$$A_{12} = \int_0^{\Phi} Id\Phi = I\Phi. \quad (8)$$

4. Сила Лоренца

Силою Лоренца прийнято називати силу, з якою магнітне поле діє на окрему заряджену частинку, що рухається. Знайдемо вираз для сили. Для цього представимо силу струму у вигляді $I = jS$, щільність струму $j = nqv$ (див. тему «Постійний струм»). Тоді

$$I = nqvS, \quad (9)$$

де n – концентрація носіїв заряду; q – заряд одного носія; v – швидкість носія, S – площа поперечного перерізу провідника.

Підстановка виразу (9) у формулу (1) дає

$$d\vec{F} = nqvS[d\vec{l}, \vec{B}] = nqSdl[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (10)$$

В останньому виразі враховано, що вектори \vec{v} та $d\vec{l}$ збігаються у напрямку. Добуток $nSdl$ дорівнює кількості носіїв струму, що містяться в елементі струму $Id\vec{l}$. Розділивши силу $d\vec{F}$ у виразі (10) на це число, знайдемо силу Лоренца

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (11)$$

Сила Лоренца перпендикулярна до \vec{v} , і до \vec{B} : якщо дивитися з кінця \vec{F}_L , то поворот від \vec{v} до \vec{B} відбувається проти годинникової стрілки. Можна користуватися правилом лівої руки: якщо лінії поля входять у долоню, пальці спрямовані по \vec{v} , то відігнутий великий палець вказує напрямок \vec{F}_L для позитивно зарядженої частинки (для негативної частки воно буде протилежно знайденому за цим правилом напрямку).

Модуль сили Лоренца

$$F_L = qvB \sin \alpha, \quad (12)$$

де α – кут між векторами \vec{v} та \vec{B} .

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна до швидкості, вона виконує роботи. Дія сили зводиться до повідомлення зарядженої частки доцентрового прискорення.

У випадку, коли є одночасно електричне та магнітне поля, сила, що діє на заряджену частинку

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (13)$$

Цей вираз також зветься сили Лоренца або лоренцевої сили.

5. Рух заряджених частинок у магнітному полі

На заряджену частинку, що рухається в магнітному полі, діє сила Лоренца, модуль якої визначається виразом (12):

$$F_L = qvB \sin \alpha.$$

Розглянемо деякі випадки.

Випадок 1. Нехай $\alpha = 0$ (або π), тобто (або). Сила Лоренца в цьому випадку дорівнює нулю: $F_L = 0$. Частка рухатиметься рівномірно прямолінійною траєкторією (якщо магнітне поле однорідне).

Випадок 2. Нехай Сила Лоренца у разі грає роль доцентрової сили. За другим законом Ньютона

$$F_L = ma \text{ или } |q|vB = \frac{mv^2}{r},$$

звідки

$$r = \frac{v}{\frac{q}{m}B}.$$

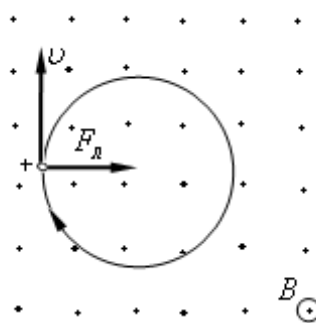


Рисунок 7

тобто частка буде рухатися по колу в площині, перпендикулярної до ліній поля (рис. 7).

Випадок 3. Кут гострий, тобто $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$. Магнітне поле однорідне. Розкладемо швидкість частинки v на дві складові: v_{\parallel} – паралельну полю, та v_{\perp} – перпендикулярну до поля: $v_{\perp} = v \sin \alpha$; $v_{\parallel} = v \cos \alpha$. Сила Лоренца чисельно дорівнює: $F_L = |q|vB \sin \alpha = |q|v_{\perp}B$ та лежить у площині, перпендикулярній вектору \vec{B} . Ця сила викличе рух по колу в площині, перпендикулярній \vec{B} .

Швидкість v_{\parallel} не змінюється, тому що вздовж поля ніякі сили на частинку не діють. Тому в напрямку поля частка рухатиметься рівномірно і прямолінійно. Результуючим рухом буде рух циліндричної спіралі, вісь якої паралельна \vec{B} .

6. Рух заряджених частинок в електричному та магнітному полях

Якщо заряджена частка потрапляє в область, де є і електричне, і магнітне поля, вона зазнає дії лоренцевої сили:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}].$$

Розглянемо деякі приклади використання практично взаємно перпендикулярних полів.

Ефект Холла. Якщо металеву пластину, по якій тече струм, помістити в магнітне поле, перпендикулярне до струму, то в пластині виникає поперечна до струму різниця потенціалів. Вона пропорційна силі струму в пластині I , індукції магнітного поля B і обернено пропорційна розміру пластини b у напрямку магнітного поля (рис. 8):

$$\varphi_2 - \varphi_1 = R \frac{I}{b} B, \quad (14)$$

де R – коефіцієнт Холла – константа, модуль якої дорівнює модулю різниці потенціалів, що виникає в пластині одиничної ширини при одиничному струмі та одиничній індукції магнітного поля.

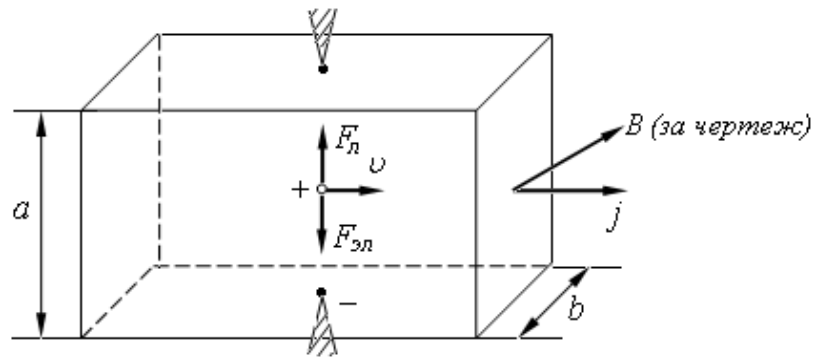


Рисунок 8

Поява у пластині різниці потенціалів означає поява у ній сторонніх сил. У явищі Холла цю роль грає сила Лоренца. Якщо магнітне поле і струм (тобто швидкість спрямованого руху позитивних носіїв заряду) спрямовані так, як показано на рис. 8, то верхня грань пластини зарядиться позитивно, нижня – негативно. Виникне електростатичне поле, спрямоване від верхньої грані до нижньої. Поділ зарядів відбуватиметься до того часу, поки сила Лоренца і електрична сила не зрівняються по модулю: $F_L = F_{эл}$. При цьому між верхньою та нижньою гранями встановиться різниця потенціалів $\varphi_2 - \varphi_1$.

Коефіцієнт Холла

$$R = \frac{1}{nq}.$$

Визначивши за знаком холлівської різниці потенціалів знак коефіцієнта Холла, можна визначити знак носіїв заряду. У формулі (14), b , I – величини позитивні. Якщо $\varphi_1 - \varphi_2 > 0$, то $R > 0$, звідси випливає, що струм створюється позитивними носіями; якщо $\varphi_1 - \varphi_2 < 0$, то $R < 0$, отже, носії заряду негативні (рис. 8).